ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY





УДК 669.017 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-66-76

Влияние структурно-фазового состояния исходного материала шихты на качественные характеристики отливок из сплава системы Al-Si-Mg

В.С. Муратов, М.С. Казаков ✉
Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация
✉Kazakov.mishel@gmail.com

Аннотация
Введение. Работа фокусируется на решении проблем качества отливок из сплава Al-Si-Mg (АК9). Отмечены отсутствие единой теории модифицирования сплавов и необходимость поиска решений, обеспечивающих хорошее качество продукции. Рассматриваются причины брака из-за слабого обоснования выбора производителя исходного шихтового материала — чушек. Чушки от двух поставщиков сравниваются с точки зрения структурно-фазового состояния. Показано, как оно обусловливает дефекты отливок. Отмечена неэффективность традиционных методов подавления образования хрупких пластин железосодержащей фазы в сплаве системы Al-Si-Mg за счет присутствия в химическом составе сплава Mn. Если указанный недостаток наследуется из исходного материала, общепринятый подход не срабатывает. Сформулированы рекомендации по решению этой выявленной проблемы. Внедрение предложенного подхода в производственную практику способно открыть путь к решению важной прикладной задачи — улучшить формулировки заданий для тендеров. Актуальность исследования обусловлена широким применением сплавов системы Al-Si-Mg (АК9) в современном машиностроении, в том числе в аэрокосмических конструкциях. Цель данной работы — изучить влияние структурно-фазового состояния исходного материала на качественные характеристики готовых отливок из сплава системы Al-Si-Mg.
Материалы и методы. Проанализированы восемь плавок, в которых использовались чушки двух производителей. Рентгенография позволила выявить корреляцию между строением излома отливок, структурой и качественными показателями. Для анализа микроструктуры и химического состава фаз использовали сканирующую электронную микроскопию. Устанавливая требования к качеству, исходили из действующих отраслевых и государственных стандартов. Из этих же документов брали условия термической обработки образцов. Спектрограммы визуализировали в виде графиков, демонстрирующих интенсивность пика элемента в оже-спектре и энергию электронов, возникших в результате оже-эффекта.
Результаты исследования. Результаты рентгенографии дают основания утверждать, что продукция, предоставляемая поставщиком № 1, обладает значимыми преимуществами в плане качества. Если ориентироваться на отраслевой стандарт, исключение из процесса чушек 2-го поставщика обеспечивает выпуск продукции без литейных дефектов на уровне 73 %. В противном случае этот показатель не превысил 57 %. Браковочными индикаторами были несплошности, скопления раковин, высокая пористость. После плавок 5–8, которые задействовали материалы 2-го производителя, исследовались изломы образцов после разрыва. Выделены локации с гладким, вязким и смешанным рельефом. Увеличение до ×500 позволило установить незначительные участки с вязким рельефом, что характерно для хрупкого разрушения по механизму скола. Установлено отсутствие включений и ликваций. Рассмотрена микроструктура шлифов из разрывных образцов. Выяснилось, что она соответствует модифицированному и термообработанному состоянию сплава АК9ч без признаков пережога. Отмечены отдельные темные игольчатые фазы и единичные поры. Описаны условия дисперсных выделений Si, выкрашивания $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$, а также выделение фазы $Al_{36}Si_3Fe_6Mn_3$ в скелетообразной форме. Перечислены преимущества микроструктуры образцов чушек от производителя № 1.

Она соответствует модифицированному состоянию сплава АК9ч. Ветви дендритов и размеры включений кремния меньше. Не обнаруживаются иглообразные фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$.
Обсуждение и заключение. Светлые участки в изломах отливок образовались по хрупкому механизму разрушения, что связано с наличием в структуре сплава пластин фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$. Если железосодержащие фазы наследуются из исходного материала, то традиционные методы подавления образования не приводят к созданию компактных равноосных полиэдров. Для повышения качества отливок рекомендуется использовать чушки с предварительно модифицированной структурой, без включения пластин фазы переменного состава $Al_xSi_yFe_zMn_q$. Полученные результаты можно задействовать в том числе для обоснования требований к материалу при проведении тендеров, что даст возможность предприятиям машиностроительной отрасли улучшить качество продукции и снизить затраты на брак. В итоге это повысит их конкурентоспособность на российском и мировом рынке.

Ключевые слова: хрупкие пластины железосодержащей фазы, сплав системы Al-Si-Mg, чушки с модифицированной структурой, качество шихты

Благодарности: авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации для корректировки статьи.

Для цитирования. Муратов В.С., Казаков М.С. Влияние структурно-фазового состояния исходного материала шихты на качественные характеристики отливок из сплава системы Al-Si-Mg. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):66–76. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-66-76

Original article

Influence of the Structural-Phase Composition of the Initial Charge Material on the Qualitative Characteristics of Castings from Al-Si-Mg System Alloy

Vladimir S. Muratov, **Mikhail S. Kazakov** ✉
Samara State Technical University, Samara, Russian Federation
✉Kazakov.mishel@gmail.com

Introduction. The work focuses on solving quality problems of castings made of Al-Si-Mg alloy (AK9). The paper draws attention to the absence of a unified theory of alloy modification and the need to find solutions that ensure good product quality. The reasons for bad quality due to the weak justification of the choice of the manufacturer of the initial charge material — ingots are considered. Ingots from two suppliers are compared in terms of the structural-phase state. The paper shows how it causes defects in castings. The inefficiency of traditional methods of suppressing the formation of brittle plates of the iron-containing phase in the alloy of the Al-Si-Mg system due to the presence of Mn in the chemical composition of the alloy is noted. If the specified flaw is inherited from the source material, the generally accepted approach does not work. The article formulates the recommendations for solving this problem. The introduction of the proposed approach into production practice can open the way to solving an important applied task — to improve the wording of tasks for tenders. The relevance of the study is due to the widespread use of alloys of the Al-Si-Mg (AK9) system in modern mechanical engineering, including in aerospace structures. The work objective is to study the influence of the structural-phase state of the source material on the qualitative characteristics of finished castings from the Al-Si-Mg alloy system.
Materials and Methods. Eight casts were analyzed, in which ingots from two manufacturers were used. Radiography revealed a correlation between the fracture structure of castings, structure and quality indicators. Scanning electron microscopy was used to analyze the microstructure and chemical composition of the phases. When setting quality requirements, the authors proceeded from the existing industry and state standards. The conditions of heat treatment of samples were taken from the same documents. The spectrograms were visualized as graphs showing the intensity of the element peak in the Auger spectrum and the energy of the electrons resulting from the Auger effect.
Results. The results of radiography gave grounds to assert that the products provided by supplier No. 1 had significant advantages in terms of quality. If we focused on the industry standard, the exclusion of the 2nd supplier's ingots from the process ensured the production of products without casting defects at the level of 73 %. Otherwise, this figure did not exceed 57 %. The rejection indicators were discontinuities, clusters of flaws, high porosity. After melting 5-8, which involved the materials of the 2nd manufacturer, the fractures of the samples after rupture were investigated. Locations with smooth, viscous and mixed relief are highlighted. An increase of up to ×500 made it possible to establish insignificant areas with a viscous relief, which was characteristic of brittle fracture by the cleavage mechanism. The absence of

inclusions and liquations was established. The microstructure of the sections from discontinuous samples was considered. It turned out that it corresponded to the modified and heat-treated state of the AK9ch alloy without signs of burnout. Individual dark needle-like phases and single pores were noted. The conditions of dispersed Si precipitations, $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ and $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$ chipping, as well as the separation of the $Al_{36}Si_3Fe_6Mn_3$ phase in skeletal form were described. The advantages of the microstructure of ingots samples from manufacturer No. 1 were listed. It corresponded to the modified state of the AK9ch alloy. The branches of dendrites and the sizes of silicon inclusions were smaller. Needle-like phases of $Al_xSi_yFe_zMn_q$ were not detected.

Discussion and Conclusion. Light areas in the castings fractures were formed by a brittle fracture mechanism, which is due to the presence of $Al_xSi_yFe_zMn_q$ phase plates in the alloy structure. If iron-containing phases are inherited from the source material, then traditional methods of suppressing formation do not lead to the creation of compact equiaxed polyhedra. To improve the quality of castings, it is recommended to use ingots with a pre-modified structure, without including phase plates of variable composition $Al_xSi_yFe_zMn_q$. The results obtained can be used, among other things, to justify the requirements for the material during tenders, which will enable the enterprises of the machine-building industry to improve the quality of products and reduce the cost of marriage. As a result, this will increase their competitiveness in the Russian and world markets.

Keywords: brittle plates of the iron-containing phase, Al-Si-Mg system alloy, structure-modified ingots, charge quality

Acknowledgements: the authors would like to thank the Editorial Board of the Journal and the Reviewer for attentive attitude to the article and suggestions made that helped to improve its quality.

For citation. Muratov VS, Kazakov MS. Influence of the Structural-Phase Composition of the Initial Charge Material on the Qualitative Characteristics of Castings from Al-Si-Mg System Alloy. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3):66–76. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-66-76

Введение. Согласно ГОСТ 1583-93[1] сплавы системы Al-Si-Mg (АК9) относятся к первой группе (силумины). Они широко используются в современном машиностроении. В аэрокосмических конструкциях на отливки из алюминиевых сплавов приходится 3–5 % массы [1].

Применение литых заготовок в сравнении с деформированным полуфабрикатом позволяет уменьшить трудоемкость механической обработки деталей и в несколько раз повысить коэффициент использования металла [2]. В аэрокосмической отрасли из данного сплава изготавливают сложные по конфигурации детали, работающие при средних нагрузках и температурах от минус 196 до плюс 175 °C[2]. Основные характеристики сплава:

– хорошие литейные свойства;
– герметичность;
– коррозионная стойкость;
– свариваемость;
– малая плотность;
– относительно высокий модуль упругости;
– низкий температурный коэффициент линейного расширения;
– износостойкость;
– доступная цена [3–7].

Свойства силуминов зависят от условий выплавки и последующей обработки [8]. Действенный метод улучшения их структуры и свойств — модификация многокомпонентными составами. Это позволяет воздействовать не только на кремний, входящий в состав эвтектики (α+Si), но и на кристаллы первичного кремния [9–10]. Отметим необходимость эффективно бороться с таким недостатком сплавов Al-Si-Mg, как газопоглощение. С этой целью применяют дегазирующие флюсы и модифицирование при пониженных температурах [11]. В настоящее время нет единой теории модифицирования, поэтому продолжается поиск оптимальных решений, позволяющих обеспечить высокий уровень качества продукции, соответствие нормативной и конструкторской документации [11]. Представленная работа призвана отчасти восполнить имеющийся в этой сфере недостаток данных.

В повышении качества отливок ведущая роль принадлежит контролю. Его задачи:

[1] ГОСТ 1583-93. *Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия*. Библиотека ГОСТов. URL: http://vsegost.com/Catalog/18/18745.shtml (дата обращения: 22.06.2023).
[2] ОСТ 92-0920-85. *Металлы и сплавы цветные. Марки, разрешенные к применению*. Техническая литература. URL: https://booktech.ru/normativy/ost/ost-92-0920-85-metally-i-splavy-cvetnye-marki-razreshennye-k-primeneniyu.html (дата обращения: 22.06.2023).

– исключить попадание дефектных отливок на механическую обработку и сборку;

– создать условия для критического анализа и совершенствования технологии литейного производства.

Сложность технологических процессов литейных цехов связана с использованием широкой номенклатуры материалов. Формирование качества отливок обусловливается многими факторами. Наиболее критичные из них:

– качество исходных формовочных, шихтовых и вспомогательных материалов;

– уровень механизации и автоматизации технологического процесса;

– соблюдение технологического процесса на всех стадиях производства;

– организация производства и управления цехом.

В рамках представленной работы анализируются причины роста брака, связанного с недостаточно обоснованным выбором производителя шихтового материала — чушек. Даются рекомендации по устранению данной проблемы. Выполнен сравнительный анализ структурно-фазового состояния исходного материала от двух поставщиков. Показано, как дефекты в отливках сплава системы Al-Si-Mg зависят от структурно-фазового состояния исходных шихтовых материалов.

Следует признать неэффективность традиционных методов подавления образования хрупких пластин железосодержащей фазы в сплаве системы Al-Si-Mg за счет обязательного присутствия в химическом составе сплава Mn. Речь идет о случаях, когда указанный недостаток наследуется из исходного материала. Сформулированы рекомендации по решению этой выявленной проблемы. Для повышения качества отливок целесообразно использовать шихту из чушек с предварительно модифицированной структурой. В ней не должно быть включения пластин фазы переменного состава AlxSiyFezMnq.

Цель данной работы — изучить влияние структурно-фазового состояния исходного материала на качественные характеристики готовых отливок из сплава системы Al-Si-Mg.

Материалы и методы. По результатам восьми плавок проанализированы характеристики отливок из сплава АК9ч В качестве исходного материала применялись чушки от производителей № 1 и № 2. Чушки переплавлялись с отходами собственного производства (некондиционные отливки из сплава АК9ч). Процентное соотношение материалов представлено в табл. 1. Производитель выбирается по результатам конкурсной закупки из соображений экономической целесообразности. В любом случае материал должен соответствовать ГОСТ 1583-96. Метод изготовления — литье в кокиль.

Таблица 1

Процентное содержание (по массе) исходных материалов в общей плавке

№ плавки	Производитель № 1	Производитель № 2	Отходы собственного производства
1	40	0	60
2	35	0	65
3	25	0	75
4	20	0	80
5	20	5	75
6	10	20	70
7	5	20	75
8	0	20	80

Химический состав образцов определялся спектральным методом на приборе МФС-8. Механические свойства исследовались на отдельно отлитых образцах (ГОСТ 1497-84[3]) после термической обработки в режиме Т6 (закалка — 535±5 °С, охлаждение в воде, старение — 175±5 °С). Для определения механических свойств использовали разрывную машину УТС-111.2-100-22. Микроструктуру исследовали по шлифам, вырезанным из клиновых проб, чушкам и разрывным образцам, травленным в реактиве Келлера, а также на изломах. Задействовали стереоскопический микроскоп Zeiss Stemi2000-C и металлографический микроскоп Carl Zeiss AxiovertA1. Метод сканирующей электронной микроскопии реализовали с помощью микроскопа JED-2300 AnalysisStation. Химический состав фаз фиксировали методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Макроструктура оценивалась на изломах клиновых проб, а также на протравленных в щелочном растворе темплетах, вырезанных из клиновых проб и чушек. Наличие внутренних дефектов отливок определялось с помощью рентгенаппарата «Руслан-225».

Результаты исследования. Химический состав образцов от каждой плавки представлен в таблице 2.

[3] ГОСТ 1497-84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Библиотека ГОСТов. URL: http://vsegost.com/Catalog/46/4616.shtml (дата обращения: 25.06.2023).

Таблица 2

Результаты определения химического состава образцов

№ плавки	Содержание элементов, масс. %									
	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Ti	Zr	Be
1	Основа	8,71	0,22	0,28	0,44	<0,1	<0,2	0,082	<0,1	<0,1
2		9,35	0,24	0,31	0,44	0,1	<0,2	0,097	0,03	<0,1
3		8,56	0,23	0,28	0,45	0,12	<0,2	0,06	0,03	<0,1
4		9,28	0,23	0,32	0,44	0,12	<0,2	0,1	0,03	<0,1
5		8,8	0,26	0,3	0,45	0,11	<0,2	0,065	0,03	<0,1
6		8,5	0,23	0,28	0,52	0,13	<0,2	<0,05	<0,1	<0,1
7		8,8	0,26	0,3	0,45	0,11	<0,2	0,055	0,03	<0,1
8		9,28	0,23	0,32	0,44	0,12	<0,2	<0,1	<0,1	<0,1
Требования по ГОСТ 1583-93										
	Основа	8–10,5	0,17–0,30	0,2–0,5	≤0,9	≤0,3	0,3	∑ ≤ 0,15		<0,1

Данные таблицы 2 доказывают, что по химическому составу материал отливок от всех садок соответствует ГОСТ 1583-93.

Результаты испытания механических свойств представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытания механических свойств

№ плавки	$\sigma_в$, МПа	δ, %
1	280	9
2	280	6
3	270	7
4	280	3
5	340	6
6	290	6
7	340	6
8	290	7
Требования по ГОСТ 1583-93		
	≥ 235	≥ 3

Из таблицы 3 видно, что по уровню механических свойств материал отливок от всех садок соответствует требованиям ГОСТ 1583-93 для состояния Т6. Сопоставляются временное сопротивление разрыву и относительное удлинение.

Рентгенография показала, что для плавок 1–4, в которых нет чушек от производителя № 2, выход годной продукции, соответствующей ОСТ 92-1165-2014 в части литейных дефектов, составил 73 %. Для плавок 5–8 выход годной продукции — 57 %. Браковочные признаки:

– несплошности в виде раковин;

– скопления раковин;

– пористость сверх допустимого уровня по рентгенэталону (рентгеновская пленка, полученная после рентгенографического контроля образца с нормированной пористостью, соответствующей определенному баллу[4]).

Исследование изломов клиновых проб показало, что для плавок 5–8 характерен излом светло-серого цвета, матовый, с мелкими, светлыми, блестящими участками различной формы и размеров (рис. 1).

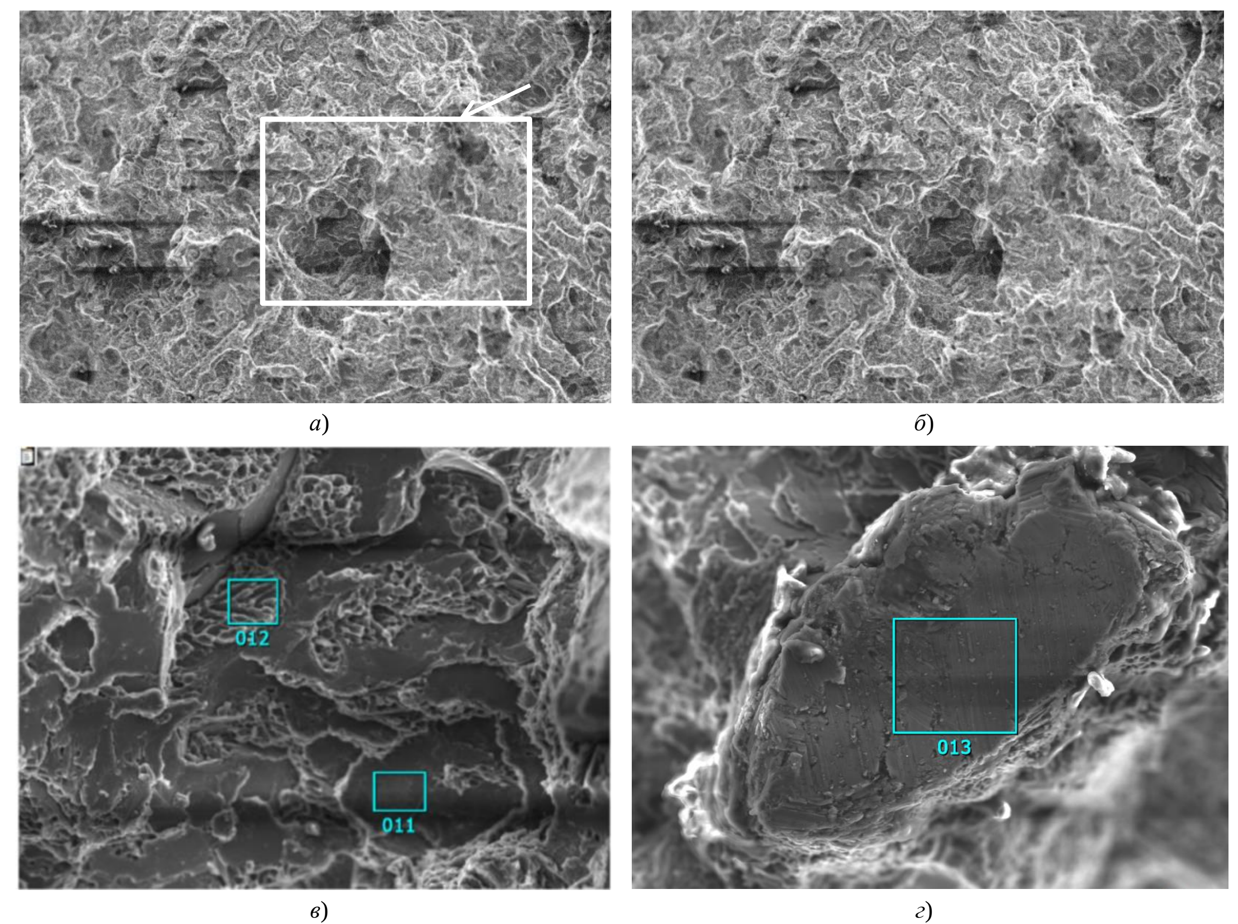
[4] ОСТ 92-1165-75. *Отливки из алюминиевых сплавов. Технические требования*. Техническая литература. URL: https://booktech.ru/normativy/ost/ost-92-1165-75-otlivki-iz-alyuminievyh-splavov-tehnicheskie-trebovaniya.html (дата обращения: 21.06.2023).



Рис. 1. Внешний вид излома плавок 5–8 (увеличение ×6,5)

В микроструктуре под поверхностью изломов не выявлены включения или другие дефекты, которые однозначно обусловили бы светлые, блестящие участки. В макроструктуре некоторых плавок под поверхностью излома наблюдалась пористость 2 балла по ГОСТ 1583-93. Наличие пористости не объясняет светлые участки в изломах, так как пористость наблюдалась не на всех клиновых пробах, но внешний вид всех изломов был идентичным.

Изломы разрывных образцов, полученные после испытаний механических свойств плавок 5–8, исследовали под электронным микроскопом. Светлым, блестящим участкам (рис. 1) соответствует темный участок на рис. 2 *а*. Внешний вид поверхности разрушения при различных увеличениях представлен на рис. 2.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 2. Поверхность излома разрывного образца: *а* — общий вид с увеличением ×50; *б* — участки с гладким рельефом с увеличением ×150; *в* — смешанный рельеф с увеличением ×200; *г* — крупный сглаженный участок излома с увеличением ×200

При увеличении до ×500 видно, что блестящие участки представляют собой углубления, чаще со сглаженной поверхностью. Присутствуют незначительные участки с вязким рельефом, что характерно для хрупкого разрушения по механизму скола. Основная часть поверхности излома имеет вязкий рельеф. Результаты микрорентгеноспектрального анализа поверхности излома в точках 11, 12, 13 (рис. 2) представлены в таблице 4. Точки 11 и 13 соответствуют сглаженным участкам, точка 12 — вязкому.

Таблица 4

Химический анализ поверхности зон излома

№ точки (см. рис. 2)	Содержание элементов, масс. %			
	Mg	Al	Si	Fe
11	4,71	82,61	11,27	1,41
12	4,51	83,35	9,46	2,68
13	5,13	84,72	8,11	2,04

Спектрограммы точек идентичны (рис. 3). Не выявлены существенные отличия по химическому составу между зонами с вязким и хрупким сглаженным рельефом, что говорит об отсутствии включений и ликваций.

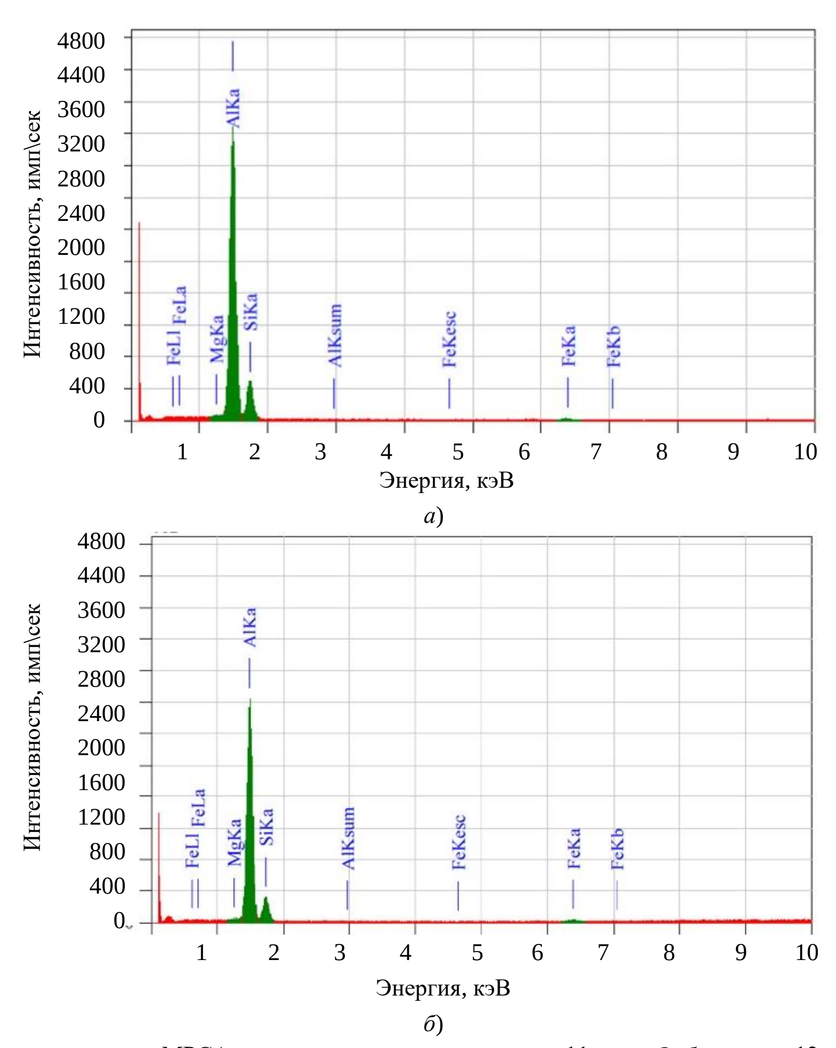
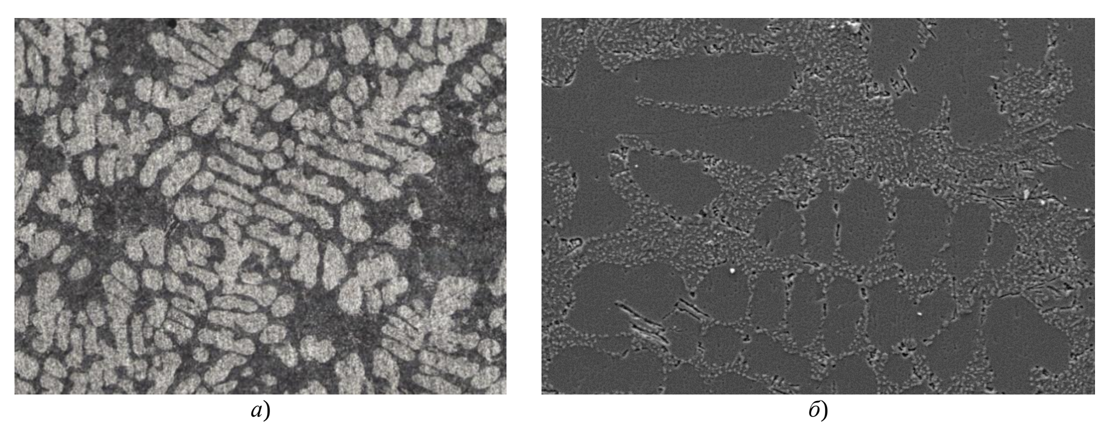


Рис. 3. Спектрограмма результатов МРСА поверхности излома: *а* — точка 11 с рис. 2; *б* — точка 12 с рис. 2. Здесь показаны интенсивность пика элемента в оже-спектре и энергия электронов, возникших в результате оже-эффекта

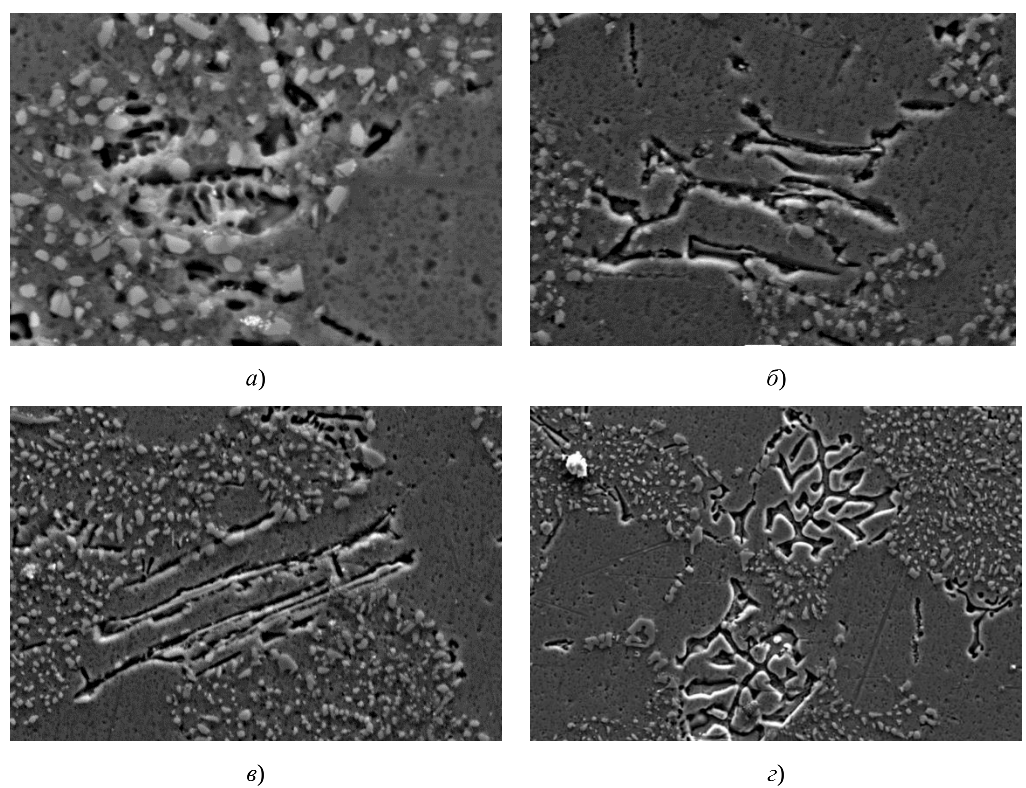
Микроструктура, исследованная на шлифах из разрывных образцов (плавки 5–8), соответствует модифицированному и термообработанному состоянию сплава АК9ч без признаков пережога (рис. 4 *а*). Наблюдаются отдельные темные игольчатые фазы и единичные поры. Под электронным микроскопом хорошо видны основные фазовые составляющие микроструктуры (рис. 4 *б*).



а) *б*)

Рис. 4. Внешний вид микроструктуры: *а* — световая оптическая микроскопия с увеличением ×200;
б — электронная микроскопия с увеличением ×250

Данные электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа позволяют определить основные фазы: α (светлые зоны), α+Si (темные зоны). В фазе α+Si наблюдаются дисперсные выделения Si размером менее 5 мкм (рис. 5 *а*). Микрорентгеноспектральный анализ показал, что $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$ (рис. 5 *б*, *в*) частично выкрошились в процессе шлифования и полировки (рис. 5 *в*). Также наблюдается выделение фазы $Al_{36}Si_3Fe_6Mn_3$ в скелетообразной форме (рис. 5 *г*).

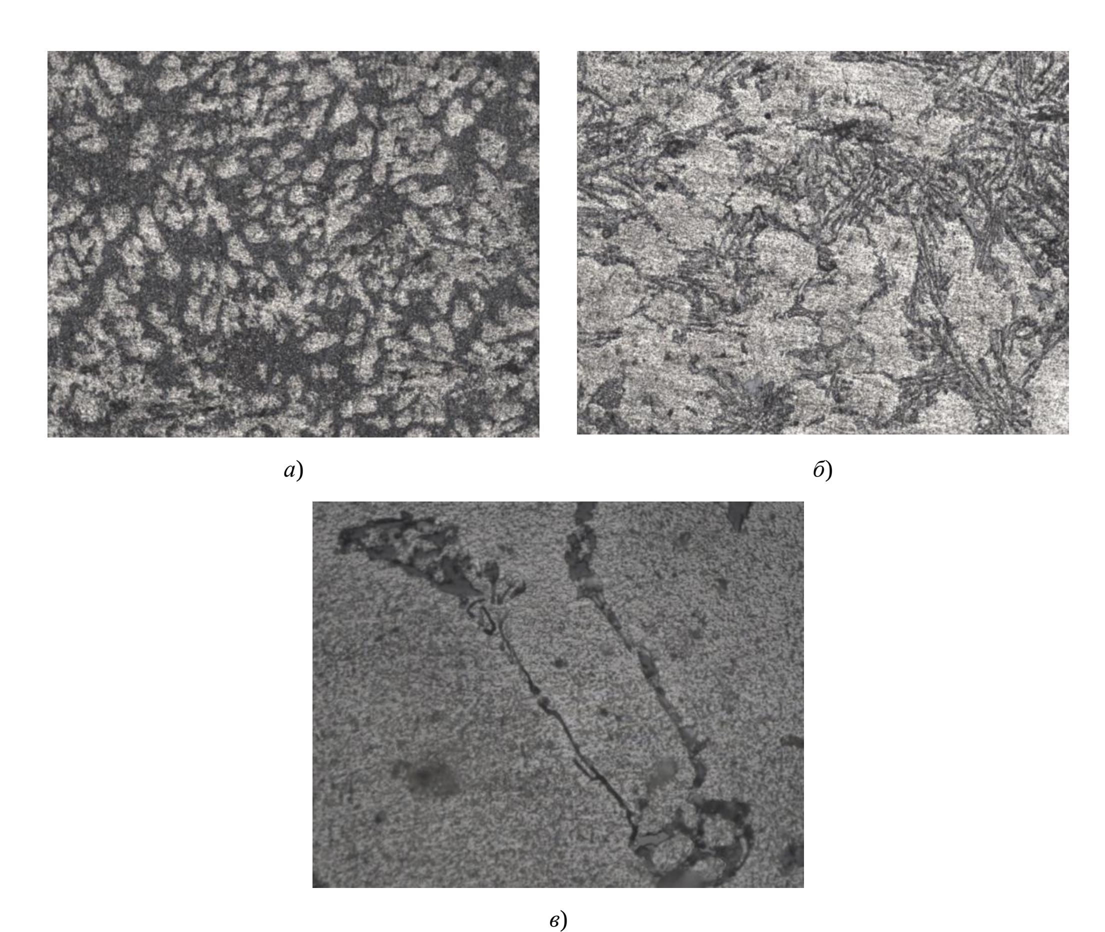


а) *б*)

в) *г*)

Рис. 5. Микроструктура образцов плавки (5–8): *а* — выделения кремния с увеличением ×2000; *б* — фазы $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$ с увеличением ×1000; *в* — выкрашивание хрупких пластин фаз $Al_{32}Si_{10}Fe_5Mn$ и $Al_{37}Si_5Fe_5Mn$ с увеличением ×750; *г* — фаза $Al_{36}Si_3Fe_6Mn_3$ в скелетообразной форме с увеличением ×500

Микроструктура образцов чушек от производителя № 1 соответствует модифицированному состоянию сплава АК9ч. Ветви дендритов значительно меньше, чем в образце чушки от поставщика № 2. Размеры включений кремния — до 4 мкм. Они однородны и имеют глобулярный вид. Основные фазы α и α+Si (рис. 6 *а*). В структуре образцов чушек от производителя № 1 не обнаружены иглообразные фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$.



а) *б*)

в)

Рис. 6. Микроструктура исходной чушки: *а* — производителя № 1, 70 мкм с увеличением ×500;
б — производителя № 2, 70 мкм с увеличением ×500;
в — пластинчатая фаза в микроструктуре чушки производителя № 2, 20 мкм с увеличением ×1000

Микроструктура образца чушки от поставщика № 2 соответствует немодифицированному состоянию сплава АК9ч. Ветви дендритов крупные. Включения кремния иглообразные и крупные. Основные фазы — α и α+Si (рис. 6 *б*). Наблюдаются фазы в виде темных иглообразных включений (рис. 6 *в*).

Анализ результатов исследования позволяет предположить, что структурно-фазовый состав сплава обусловливает присутствие блестящих участков в изломе образцов от плавок 5–8. Это зоны со сглаженным рельефом — результаты хрупкого разрушения. Наиболее вероятная причина данного явления — наличие зон с грубыми иглообразными выделениями, которые представляют собой хрупкие пластины $Al_xSi_yFe_zMn_q$ с выраженной границей раздела. При растяжении или других разрушающих испытаниях эти выделения выступают в виде концентраторов (разрывов в металле). Соответственно, когда через них идет фронт развития трещины, происходит их выкрашивание. Поясним. Пластинчатые выделения — твердые и слабо удерживаются в основном металле. В процессе шлифовки и полировки образцов они выкрашивались, оставляя полости с гладкими стенками. На их месте остаются гладкие участки, которые блестят в изломе. Также можно предположить, что данные фазы устойчивы в расплаве (не растворяются в матрице). При охлаждении они будут выступать в виде центров кристаллизации и провоцировать образование дефектов, так как представляют собой острые концентраторы напряжений.

Кремний кристаллизовался в виде мелких частичек сферической формы, поэтому можно констатировать, что используемый модификатор эффективен для воздействия на кремний, входящий в состав эвтектики (α+Si). При этом для воздействия на игольчатые фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$ требуется корректировка технологического процесса. При введении 0,2–0,5 % Mn, как правило, удается подавить образование хрупких пластин фазы $Al_xSi_yFe_zMn_q$. Однако в исследуемых плавках (5–8), несмотря на содержание Mn 0,28–0,32 %, эта фаза сохраняется, так как она наследуется из исходного материала.

Обсуждение и заключение. По итогам проведенных научных изысканий можно сделать три основных вывода.

1. Структурно-фазовое состояние исходного материала наследуется в отливках и при наличии железосодержащих фаз в виде хрупких пластин может отрицательно влиять на качественные характеристики литых заготовок.

2. Светлые участки в изломах отливок представляют собой зоны со сглаженным рельефом. Они образовались в результате хрупкого разрушения, что связано с наличием переменного состава $Al_xSi_yFe_zMn_q$ в структуре хрупких пластин фазы.

3. Присутствие в химическом составе сплава Mn не всегда подавляет образование хрупких пластин железосодержащей фазы. Если она наследуется из исходного материала, данный традиционный подход не работает и не образуются компактные равноосные полиэдры с более слабым негативным влиянием. Для повышения качества отливок рекомендуется использовать в шихте чушки с предварительно модифицированной структурой, в которой отсутствуют включения пластин фазы переменного состава $Al_xSi_yFe_zMn_q$.

Список литературы

1. Полмеар Я. *Легкие сплавы: от традиционных до нанокристаллов*. Москва: Техносфера; 2008. 464 с. URL: https://www.technosphera.ru/lib/book/72?read=1 (дата обращения: 26.06.2023).
2. Золоторевский В.С., Белов Н.А. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов*. Москва: МИСиС; 2005. 376 с. URL: https://e.lanbook.com/book/2055 (дата обращения: 26.06.2023).
3. Wei Yan, Weiqing Chen, Senlin Zhang, Bing Li, Jing Li. Evolution of solidification structures and mechanical properties of high-Si Al alloys under permanent magnetic stirring. *Materials Characterization*. 2019;157:109894. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109894
4. Makhlouf M.M., Guthy H.V. The aluminum–silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals*. 2001;1(4): 199–218. https://doi.org/10.1016/S1471-5317(02)00003-2
5. Haizhi Ye. An overview of the development of Al-Si alloy based material for engine applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2003;12:288–297. https://doi.org/10.1361/105994903770343132
6. Афанасьев В.К., Попова М.В., Прудников А.Н. Воздействие водорода на структуру и свойства заэвтектического силумина с 15% кремния. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022;(6):10–16. https://doi.org/10.30906/mitom.2022.6.10-16
7. Sathyapal Hegde, K. Narayan Prabhu. Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys. *Journal of Materials Science*. 2008;43:3009–3027 https://doi.org/10.1007/s10853-008-2505-5
8. Кузнецов А.О., Шадаев Д.А., Конкевич В.Ю. Модифицирование силуминов — разные подходы для одной системы легирования. *Технология легких сплавов.* 2014;(4):75–81.
9. Напалков В.И., Махов С.В., Поздняков А.В. *Модифицирование алюминиевых сплавов.* Москва: МИСиС; 2017. 347 с. URL: https://e.lanbook.com/book/117172 (дата обращения: 26.06.2023).
10. Jing Zhang, Hongmei Chen, Hui Yu, Yunxue Jin. Study on dual modification of Al-17%Si alloys by structural heredity. *Metals*. 2015;5(2):1112–1126 https://doi.org/10.3390/met5021112
11. FQ Zu, Li Xiaoyun. Functions and mechanism of modification elements in eutectic solidification of Al-Si alloys. *China Foundry*. 2014;11(4):287–309 URL: https://www.researchgate.net/publication/274634943_Special_Report_CHINA_FOUNDRY_Functions_and_mechanism_of_modification_elements_in_eutectic_solidification_of_Al-Si_alloys_A_brief_review (дата обращения: 26.06.2023).

References

1. Polmear Ya. *Legkie splavy: ot traditsionnykh do nanokristallov*. Moscow: Tekhnosfera; 2008. 464 p. URL: https://www.technosphera.ru/lib/book/72?read=1 (accessed: 26.06.2023).
2. Zolotorevskii VS, Belov NA. Metallovedenie liteinykh alyuminievykh splavov. Moscow: MISiS; 2005. 376 p. URL: https://e.lanbook.com/book/2055 (accessed: 26.06.2023).
3. Wei Yan, Weiqing Chen, Senlin Zhang, Bing Li, Jing Li. Evolution of solidification structures and mechanical properties of high-Si Al alloys under permanent magnetic stirring. *Materials Characterization*. 2019;157:109894. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109894
4. Makhlouf MM, Guthy HV. The aluminum–silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals*. 2001;1(4): 199–218. https://doi.org/10.1016/S1471-5317(02)00003-2
5. Haizhi Ye. An overview of the development of Al-Si alloy based material for engine applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2003;12:288–297. https://doi.org/10.1361/105994903770343132
6. Afanasev VK, Popova MV, Prudnikov AN. Effect of hydrogen on the structure and properties of eutectic silumin with 15% silicon. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2022;(6):10–16. https://doi.org/10.30906/mitom.2022.6.10-16
7. Sathyapal Hegde, K. Narayan Prabhu. Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys. *Journal of Materials Science*. 2008;43:3009–3027 https://doi.org/10.1007/s10853-008-2505-5

8. Kuznetsov AO, Shadayev DA, Konkevich VYu, Bochvar SG, Kunyavskaya TM. Modification of silumins: different approaches for one alloying system. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2014;(4):75–81.

9. Napalkov VI, Makhov SV, Pozdnyakov AV. Modifitsirovanie alyuminievykh splavov. Moscow: MISiS; 2017. 347 p. URL: https://e.lanbook.com/book/117172 (accessed: 26.06.2023).

10. Jing Zhang, Hongmei Chen, Hui Yu, Yunxue Jin. Study on dual modification of Al-17%Si alloys by structural heredity. *Metals*. 2015;5(2):1112–1126 https://doi.org/10.3390/met5021112

11. FQ Zu, Li Xiaoyun. Functions and mechanism of modification elements in eutectic solidification of Al-Si alloys. *China Foundry*. 2014;11(4):287–309 URL: https://www.researchgate.net/publication/274634943_Special_Report_CHINA_FOUNDRY_Functions_and_mechanism_of_modification_elements_in_eutectic_solidification_of_Al-Si_alloys_A_brief_review (accessed: 26.06.2023).

Об авторах:

Владимир Сергеевич Муратов, доктор технических наук, профессор кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов Самарского государственного технического университета (443100, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, muratov1956@mail.ru

Михаил Сергеевич Казаков, аспирант кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов Самарского государственного технического университета (443100, РФ, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), ResearcherID, ORCID, kazakov.mishel@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

В.С. Муратов — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

М.С. Казаков — формулирование основной концепции, целей и задач исследования, проведение испытаний, анализ, контроль, подготовка текста, формулирование выводов.

Поступила в редакцию 01.07.2023
Поступила после рецензирования 26.07.2023
Принята к публикации 03.08.2023

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 01.07.2023
Revised 26.07.2023
Accepted 03.08.2023

About the Authors:

Vladimir S. Muratov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, RF), ResearcherID, ScopusID, ORCID, muratov1956@mail.ru

Mikhail S. Kazakov, Postgraduate Student of the Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials Department, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, RF), ResearcherID, ORCID, kazakov.mishel@gmail.com

Claimed contributorship:

VS Muratov: academic advising; research results analysis; revision of the text; conclusions correction.

MS Kazakov: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study; testing; analysis; control; text preparation; conclusions formulation.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.